

一种稳健的分布式检测算法

刘向阳^{①②} 彭应宁^①

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(西安通信学院一系 西安 710106)

摘要 在多雷达分布式检测系统中各个雷达的信噪比各不相同且没有办法对实际的信噪比进行有效估计时, 基于 N 选 k 融合的分布式检测策略最稳健的方法就是选择 N 选 1 融合, 但是这种方法相对于系统所能达到的检测性能有很大的损失, 该文提出了一种基于 4 元局部判决的方法, 融合中心作 3 种 N 选 k 融合, 然后将 3 种融合结果进行‘或’运算以得到最终判决结果。仿真表明该方法比 N 选 1 融合具有更好的检测性能, 能适应各个雷达输入信噪比剧烈变化的情况, 是一种稳健的多传感器分布式检测方法。

关键词 多雷达分布式检测, 分布式检测, 四元局部判决, 稳健的分布式检测, 广义符号检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-1985-04

A type of Robust Distributed Detection Algorithm

Liu Xiang-yang^{①②} Peng Ying-ning^①

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(The First Department, Xi'an Communication College, Xi'an 710106, China)

Abstract It is possible that the input signal-to-noise ratio of different radars may be different and their reliable estimation may be impossible in practical multiradar distributed detection scenario. So the most robust fusion rule is 1 out of N , which has severe signal-to-noise ratio loss comparable with the whole detection scheme's potential. A new type of quarternary local decision based distributed detection algorithm is presented where the fusion center firstly perform three kinds of k out of N fusion and then fuses the obtained decision. Monte Carlo simulation revealed that the proposed algorithm has better detection performance than 1 out of N based scheme and can work well when the input SNRs change violently. So it is a robust distributed detection algorithm.

Key words Multiradar distributed detection; Distributed detection; Quarternary local decision; Robust distributed detection; Generalized sign detection

1 引言

多传感器分布式检测检测技术经过多年的发展取得了很多理论成果^[1]。大部分的研究集中在开发高效的局部处理算法和融合算法。当信号和噪声的统计特征已知时, 可以得到最佳的奈曼-皮尔逊分布式检测策略。在信号和噪声的统计特性未知或时变但各个传感器的信噪比相同条件下, 文献[2]分别研究了基于二元局部判决的分布式广义符号检测和分布式CA-CFAR, 各个局部处理器向融合中心传代表目标有无的二元局部判决, 融合中心基于 N 选 k 融合准则进行融合处理以得到最终的全局判决, 所谓 N 选 k 融合是指 N 个传感器中只要有 k 个传感器认为目标存在融合中心就认为目标存在的融合准则。但是很显然要求地理上分散的各个传感器接收到的目标回波信号具有相同的信噪比是比较苛刻的。文献[3]研究了自适应奈曼-皮尔逊分布式决策融合, 文中所给算法需要经过训练才能收敛, 而在雷达警戒网络中运动目标经过雷达的分辨单元的时间是有限的, 因而雷达采集到的样本数量也是有限的, 并且目标的出现具

有偶发性, 难以满足算法收敛要求。理论上讲, 信噪比决定了检测器的检测概率, 如果能得到各个雷达回波信号的信噪比, 通过信噪比加权就能实现最佳融合, 但是在实际的多雷达分布式检测中, 各个雷达回波信号的信噪比是不可能事先得到的, 雷达所监视的目标的速度都是很高的, 当前的扫描能发现目标, 但是到下次扫描时, 目标可能已经飞离该分辨单元, 而目标回波信号一般来说也是起伏的, 服从某种统计分布, 通过少量样本对信噪比的估计误差也是很大的。因而我们不能可靠地估计信噪比。这样基于已知信噪比的融合方法就不再适用了。对于“ N 选 k ”融合准则而言, 当有 $k-1$ 个传感器的信噪比很高而其余传感器的信噪比为零时, 融合中心就检测不到目标。当待检测目标处于各个雷达的雷达威力范围的边缘时, 目标相对于雷达站的飞行姿态的不同可能导致目标的RCS有较大的差异, 回波信号的信噪比有时可能相差几十分贝。在这种各个传感器的信噪比差异性很大的情况下, “ N 选1”准则显然有最稳健的性能, 但是当各个雷达的输入信噪比相同时可以验证它的性能却是最差的。本文提出了一种适用于 3 个或 3 个以上传感器的分布式检测算法, 在只有一个传感器的信噪

比较高而其余传感器的信噪比都比较低时接近“N选1”的性能，随着其余传感器的信噪比的提高，该算法的性能逐渐提高，当各个传感器的信噪比都相同时性能接近“N选k”融合准则取最佳k值时的性能。

2 算法描述

传感器的结构采用并行分布式检测结构，设传感器个数 $N \geq 3$ 。各个传感器利用自己探测到的信号做出局部判决并送给融合中心，融合中心进行融合处理以得到目标有无的全局判决。各个传感器间没有数据交换。这里我们限制各个传感器向融合中心传送 2 bit 的信息，用三位二进制数分别编码为 000, 001, 011, 111，令最左边的为第一位，最右边的为第 3 位，中间的为第二位。这相当于将局部检测统计量的取值分成 4 部分。设各个传感器的局部处理器结构相同。传感器 i 进行如下形式的判决：

$$\begin{cases} S_i > t_3, & u_i = e_{i1}e_{i2}e_{i3} = 111 \\ t_3 > S_i > t_2, & u_i = e_{i1}e_{i2}e_{i3} = 011 \\ t_2 > S_i > t_1, & u_i = e_{i1}e_{i2}e_{i3} = 001 \\ S_i < t_1, & u_i = e_{i1}e_{i2}e_{i3} = 000 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $t_1 < t_2 < t_3$ 为局部处理器的判决门限， S_i 表示传感器 i 的检测统计量， S_{0i} 表示没有信号时的检测统计量， S_{1i} 表示信号加噪声时的检测统计量。 u_i 表示第 i 个传感器的局部判决结果。 e_{ij} 表示第 i 个传感器的局部判决结果用三位二进制数表示时第 j 位的取值。融合中心的融合规则为：

$$u_0 = \left(\sum_{i=1}^N e_{i1} \geq k_1 \right) \mid \left(\sum_{i=1}^N e_{i2} \geq k_2 \right) \mid \left(\sum_{i=1}^N e_{i3} \geq k_3 \right) \quad (2)$$

其中， \mid 表示‘或’运算。 $\sum_{i=1}^N e_{ij} \geq k_j$ 表示满足不等式条件时结果为 1，否则结果为 0， $k_j (j=1,2,3)$ 为正整数且 $k_1 < k_2 < k_3 \leq N$ 。融合中心先进行 3 次初步判决，然后将三次判决的结果进行或运算就得到融合中心最终的判决。 k_1, k_2, k_3 分别为融合中心 3 次初步判决的门限，它们决定了在只有 k_j 个传感器观测到目标是本文方法的性能接近“N选 k_j ”融合的性能。

令

$$P_{\bar{d}_i} = \Pr(S_{0i} > t_i), \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

设各个传感器的 S_{0i} 独立同分布，且具有相同的门限。则融合中心的虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{fnot}} = & \sum_{\substack{j_1+j_2+j_3 \leq N \\ j_1+j_2+j_3 \geq k_1}} (1-P_{\bar{d}_1})^{N-j_1-j_2-j_3} (P_{\bar{d}_1}-P_{\bar{d}_2})^{j_1} (P_{\bar{d}_2}-P_{\bar{d}_3})^{j_2} P_{\bar{d}_3}^{j_3} \\ & \cdot \frac{N!}{(N-j_1-j_2-j_3)!j_1!j_2!j_3!} + \sum_{\substack{j_1+j_2+j_3 < k_1 \\ j_2+j_3 \geq k_2}} (1-P_{\bar{d}_1})^{N-j_1-j_2-j_3} \\ & \cdot (P_{\bar{d}_1}-P_{\bar{d}_2})^{j_1} (P_{\bar{d}_2}-P_{\bar{d}_3})^{j_2} P_{\bar{d}_3}^{j_3} \frac{N!}{(N-j_1-j_2-j_3)!j_1!j_2!j_3!} \\ & + \sum_{\substack{j_1+j_2+j_3 < k_1 \\ j_2+j_3 < k_2 \\ j_3 \geq k_3}} (1-P_{\bar{d}_1})^{N-j_1-j_2-j_3} (P_{\bar{d}_1}-P_{\bar{d}_2})^{j_1} (P_{\bar{d}_2}-P_{\bar{d}_3})^{j_2} P_{\bar{d}_3}^{j_3} \\ & \cdot \frac{N!}{(N-j_1-j_2-j_3)!j_1!j_2!j_3!} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， j_1, j_2, j_3 均为大于 -1 小于 $N+1$ 的整数。 P_{fnot} 与 $P_{\bar{d}_1}, P_{\bar{d}_2}, P_{\bar{d}_3}$ 这 3 个参数有关。给定融合中心的虚警概率后，必须先设定两个参数才能决定第 3 个参数。由于 $P_{\bar{d}_1} > P_{\bar{d}_2} > P_{\bar{d}_3}$ ，当 $P_{\bar{d}_1}, P_{\bar{d}_3}$ 和 P_{fnot} 确定后， $P_{\bar{d}_2}$ 可以唯一确定。门限参数的确定：

(1) 根据“N选k”融合准则确定在给定的杂波和目标模型下基于二元局部判决的分布式检测器的最佳k值，记为 k_{opt} ，可令 $k_3 = k_{\text{opt}}$ 。

(2) 根据各个传感器目标回波信号的信噪比的先验知识来确定 k_3 。如果我们知道在 N 个传感器中至少有 k_{min} 个传感器目标回波信号具有较高的信噪比，这时可以选择 $k_1 = k_{\text{min}}$ 。

(3) 在 k_1, k_3 确定之后，利用 $k_1 < k_2 < k_3$ ，可以确定若干个可选的 k_2 ，对于每一组 (k_1, k_2, k_3) 可以搜索出满足式(4)的一系列 $P_{\bar{d}_1}, P_{\bar{d}_2}$ 和 $P_{\bar{d}_3}$ 。选择 $P_{\bar{d}_1}$ 使之尽可能接近在融合中心采用“N选 k_{opt} ”融合准则时局部传感器的虚警概率；选择 $P_{\bar{d}_3}$ 使之尽可能接近在融合中心采用“N选 k_{min} ”融合准则时局部传感器的虚警概率。在 $P_{\bar{d}_1}$ 和 $P_{\bar{d}_3}$ 确定之后，根据式(4)可以确定 $P_{\bar{d}_2}$ 的值。

(4) 在 $P_{\bar{d}_1}, P_{\bar{d}_2}$ 和 $P_{\bar{d}_3}$ 确定后，可以利用 S_{0i} 的分布函数通过式(3)确定局部门限 t_1, t_2 和 t_3 。在 S_{0i} 服从离散分布时，必须进行随机化检验才能满足给定的虚警率要求。

通过上述步骤获得的 $P_{\bar{d}_1}, P_{\bar{d}_2}$ 和 $P_{\bar{d}_3}$ 可能不唯一，此时可以通过蒙特卡洛模拟选择使检测算法总的检测概率最高的一组参数或者选择一组自己认为满意的参数。

3 性能分析和数值结果

检测器采用并行结构。每一个传感器都对同一现象进行观测，各个传感器的局部处理器对各自的观测信号独立进行处理形成局部处理结果，送到数据融合中心进行融合处理以得到目标有无的全局判决。对于在独立同分布的韦布尔杂波中检测斯威林 II 目标的问题等价于如下的二元假设检验问题：

$$\left. \begin{aligned} H_0: & X_{ij} = c_{ij}, \\ H_1: & X_{ij} = \sqrt{v_{ij}^2 + c_{ij}^2 + 2v_{ij}c_{ij} \cos(\theta_{ij} - \phi_{ij})}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$i=1, \dots, N, \quad j=1, \dots, M$$

其中， N 是传感器个数， M 为每传感器的脉冲积累数， v_{ij} 是传感器 i 的第 j 个脉冲的目标回波信号幅度， v_{ij} 服从参数为 λ_i 的瑞利分布

$$f_V(v) = \frac{2v}{\lambda_i} \exp(-v^2/\lambda_i), \quad v > 0, \lambda_i > 0 \quad (6)$$

θ_{ij} 是相应的目标回波信号相位， c_{ij} 是相应的杂波幅度，杂波幅度服从韦布尔分布

$$\begin{aligned} f_{c_w}(c_{ij}) = & \frac{\alpha_i}{\beta_i} (c_i/\beta_i)^{\alpha_i-1} \exp\left[-(c_{ij}/\beta_i)^{\alpha_i}\right], \\ & c_{ij} > 0, \alpha_i > 0, \beta_i > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 α_i 和 β_i 分别是韦布尔分布的形状参数和尺度参数， ϕ_{ij} 是杂波相位。传感器 i 利用广义符号检测器^[4]按照上述算法形

成四元局部判决送给融合中心,融合中心进行融合处理。传感器*i*采用广义符号检测时

$$S_i = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^R u(X_j - y_{ji}), \quad \text{其中 } u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

y_{ji} 为传感器*i*的第*j*个脉冲回波信号的参考信号, R 为参考单元个数。 S_{0i} 为离散随机变量,且 S_{01}, \dots, S_{0N} 独立同分布。因此必须进行随机化检验才能保证融合中心的虚警概率为设定值。

将各个传感器分成两类,能看到目标的传感器,它们具有相同的信噪比;看不到目标的传感器,它们的信噪比为 0,即只有噪声。当然实际情况可能是各个传感器都能探测到目标但是它们的信噪比不完全相等,信噪比最低传感器的信噪比也大于 0,或多或少都含有目标回波信息。本文的仿真试验基于 5 传感器并行分布式检测系统,每个传感器的脉冲积累数 $M=16$,每脉冲参考单元数为 16,韦布尔杂波的形状参数 $\alpha=1$ 。N选*k*融合特指文献[2]中提出的基于二元局部判决的分布式广义符号检测器采用N选*k*融合时的检测策略。融合中心的虚警概率设为 10^{-6} 。检测概率都通过 2 万次蒙特卡洛试验得到。

通过仿真实验可知,在各个传感器信噪比相等时,基于二元局部判决的分布式广义符号检测器^[2]在韦布尔杂波和斯威林II目标条件下的最佳融合方式为 5 选 4 融合,故令 $k_3=4$,假设在最差情况下只有一个传感器能观测到目标,则此时可令 $k_1=1$,而 k_2 可取 2, 3。如果我们需要本文方法在 3 个传感器能观测到目标时性能接近 5 选 3 融合的性能,则可令 $k_2=3$ 。若令 $k_2=2$,则只有 2 个传感器观测到目标时本文方法接近 5 选 2 融合的性能。以 $k_1=1, k_2=3, k_3=4$ 为例,给定融合中心的虚警概率 $P_{\text{not}}=10^{-6}$,可以搜索出一系列满足利用式(4)的 P_{β_1}, P_{β_2} 和 P_{β_3} 值,利用上一部分中门限参数的确定方法,可得 $P_{\beta_1}=0.01, P_{\beta_2}=0.00167$ 和 $P_{\beta_3}=10^{-7}$ 。门限 t_1, t_2 和 t_3 可根据(3)式设置。

蒙特卡洛仿真结果如图 1 所示。图 1 给出了观测到目标的传感器的个数从 1 变化到 5 时本文所提方法与基于二元局部判决的 N 选 *k* 融合方法的性能曲线,图中 sensor's number 代表观测到目标的传感器的个数。在观测到目标的传感器的个数小于 5 时, N 选 *k* 融合的 *k* 值等于观测到目标的传感器的个数。当 5 个传感器都能观测到目标时, *k* 取 4。因而图 1 中所画出的 N 选 *k* 的检测性能是它所能达到的最佳性能。在分别只有 1 个、3 个和 4 传感器的能观测到信号时,本文方法和 N 选 *k* 融合具有类似的性能。在 5 个传感器都能观测到信号时,本文方法相对于 5 选 4 方法有 1dB 的信噪比损失,大约 20%的检测概率损失。而在只有 2 个传感器探测到目标时,本文方法相对于 5 选 2 方法有 2dB 的信噪比损失,大约有 50%的检测概率损失,性能损失有一个突变。这是因为在本例中,本文方法在设计参数时以检测性能接近 N 选 1、N 选 3 和 N 选 4 为目标的,

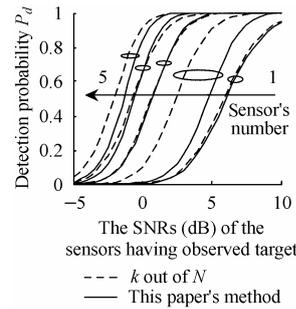


图 1 本文方法和 N 选 *k* 融合方法性能比较
Fig.1 Performance compare between *k* out of *N* fusion and this paper's method

其性能比N选 2 差也是可以预料的。由于 5 选 4 融合在融合中心的虚警概率为 10^{-6} 时局部传感器的虚警概率为 0.0212,大于 P_{β_1} ,所以 t_1 也比 5 选 4 的局部判决门限高,这就导致了在 5 个传感器均正常工作时本文方法性能要差一些。但是N选*k*方法在只有*k*-1 个或更少的传感器观测到目标时是不能正常工作的。

在实际的分布式检测环境中,如果考虑到部分传感器由于目标RCS的方向性等原因致使接收信号的信噪比非常低,而目标回波信号样本数有限的情况下, N选*k*融合的最稳健的选择就是N选 1 融合。图 2 给出了本文方法和 5 选 1 融合在观测到目标的传感器的个数由 1 变化到 5 时检测性能曲线,图中sensor's number 代表观测到目标的传感器的个数。由图 2 可知, 5 选 1 融合在 5 个传感器中分别有 1 个或 2 个雷达观测到目标时比本文方法稍好一些。因为此时本文方法相当于局部传感器的虚警概率为 10^{-7} 的 5 选 1 融合。当能观测到目标的传感器的个数等于 3 个时, 5 选 1 融合比本文方法就有至少 3dB 的信噪比损失,相应的检测概率损失约为 0.8,在 4 个以上传感器信噪比相等时 5 选 1 融合的信噪比损失甚至达到 4.5 dB,检测概率损失甚至达到了 1,可见性能恶化是非常严重的。本文提出的方法在各个传感器信噪比相等、只有一个传感器能观测到信号等极端情况下都具有较好的性能。在各个传感器的信噪比分别为 4 dB, 3 dB, 1 dB, 0 dB 和 -5 dB 时本文方法的检测概率为 0.95, 5 选 1 为 0.29, 5 选 2 为 0.87, 5 选 3 为 0.94, 5 选 4 为 0.89, 5 选 5 为 0.54, 此时本文方法甚至比N选*k*方法性能还要好。这也说明了本文方法的良好性能。

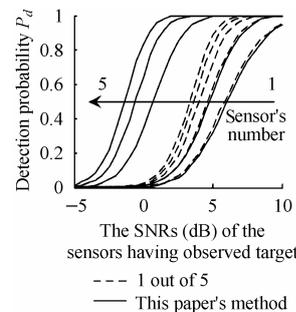


图 2 本文方法和 5 选 1 融合方法性能比较
Fig.2 Performance compare between 1 out of 5 fusion and this paper's method

4 结束语

本文提出了一种基于局部四元判决的方法,通过在融合中心作3种 N 选 k 融合,然后将3种融合结果进行‘或’运算以得到融合中心总的判决结果。这种方法比 N 选1融合具有更好的性能,在局部传感器的信噪比的各种组合下都具有较好的性能,在某些信噪比组合下甚至比任意 N 选 k 融合的性能都好,具有适应局部传感器信噪比变化的稳健性。虽然通信量是 N 选1融合的2倍,但是在通信网络的性能飞速发展的今天,增加的通信量也是可以接受的。

参 考 文 献

- [1] Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion[M]. New York, Springer-Verlag Inc. 1997, 36-251.
- [2] Al-Hussaini E K, Al-Bassiouni A M, El-Far Y A. Decentralized

CFAR signal detection[J]. *Signal Processing*, 1995, 44(3): 299-304.

- [3] Ansari N, Chen J G, Zhang Y Z, Adaptive decision fusion for unequiprobable sources[J], *IEE Proceedings of Radar sonar and Navigation*. 1997, 144(3): 105-111.
- [4] Hansen V G, Olsen B A, Nonparametric radar extraction using a generalized sign test[J], *IEEE Trans. on AES*, 1971, 7(5): 942-950.

刘向阳: 男, 1976年生, 讲师, 博士生, 研究方向为多传感器分布式检测.

彭应宁: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为高速实时信号处理、多传感器数据融合、雷达自动检测和恒虚警处理算法.